

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01172

研究課題名(和文) 高強度中性子散乱と高分解能電顕によるマントル鉱物の水素配置と水素輸送の統合解析

研究課題名(英文) Integrated analysis of crystallography and dynamics of hydrogen in deep mantle minerals by high-intensity neutron scattering and high-resolution transmission electron microscopy

研究代表者

奥地 拓生 (OKUCHI, Takuo)

京都大学・複合原子力科学研究所・教授

研究者番号：40303599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球の水素は海洋をつくる液体の水に加えて、内部のマントルをつくる鉱物の水素イオンとしても存在する。鉱物の水素イオンには、結晶構造中に定比で存在するものと不定比で存在するものがある。不定比のものはマントルの深いところで安定な場合が多く、その水素量は非常に捉えにくい。全体としては海洋水を大きく超える可能性が高い。本課題ではこれらのマントル鉱物の水素の結晶学的配置と濃度、化学結合状態、及び移動現象を、中性子散乱と高分解能透過電顕の手法によって解析した。マントル鉱物が含む水素濃度の上限が決まる理由や、水素がどのような物理的、化学的な形態をとって結晶構造中を移動するのかを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

45億年の地球史において、海の水素という特別な役割を持つ元素が水素です。しかし海にある水素は全地球質量の僅か100万分の25であり、地球は水素には恵まれていないように見えます。ここで地球の隠れた主役である岩石に着目します。実験室で高温高压の条件を再現して、内部の岩石が含む鉱物をつくり、中性子を使ってそこに入り込む水素を調べました。その結果、地球の水素が鉱物に大量に溶け込む様子がわかり、その水素が鉱物中を動き回る過程も見えてきました。

研究成果の概要(英文)：Hydrogen is involved in the Earth's oceans as liquid water. Hydrogen is also involved as cations in solid minerals occurring in the Earth's mantle. There are two types of hydrogen cations involved in these mantle minerals; hydrogen as a stoichiometric component, or hydrogen as a non-stoichiometric component filling the defects of the other cations. In this project, crystallography of hydrogen in a series of mantle minerals of mostly the latter type is established by applying neutron scattering analysis using strong pulsed neutron sources. In addition, chemical dynamics of hydrogen in crystal structures of some hydrous mantle minerals is determined by applying quasi-elastic neutron scattering analysis.

研究分野：鉱物学

キーワード：中性子散乱 透過電子顕微鏡 マントル含水鉱物 水素配置解析 水素拡散ダイナミクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

地球の進化において水は特別な役割を果たしてきた。この水(H<sub>2</sub>O)の材料となる水素(H)は、表層の海洋に加えて、鉱物中の水素イオンH<sup>+</sup>または水酸基OH<sup>-</sup>として地殻やマントルに豊富に存在する。沈み込む海洋プレート内の含水鉱物としてマントルへと継続的に輸送される水素は、プレート周辺においてマグマをつくる融剤の役割を果たすことに加えて、マントルの物性・化学組成にも様々な不均質を誘起してきたと考えられている。

このマントルの水素の総量および、その地球史における役割を理解するためには、含水鉱物の水素の結晶学的解析を進展させることは重要であり、それが必要な課題として残されてきた。海洋プレートの表層において新たに生成する含水鉱物の結晶構造においては、水素の位置(サイト)は水酸基の一部としてほぼ明確な場合が多いと考えられてきた。このような含水鉱物では水素は定比の成分であり、水素イオンは結晶構造の空間対称性に従って特定のサイトに秩序的に配置される。一方で水素がプレートに乗って沈み込み、マントルの遷移層およびそれよりも深くに運ばれた際には、そこに元々存在する高密度の鉱物が、運ばれてきた水素を吸収する反応が大きく進み得ることが示されてきた。このような高密度の鉱物の結晶構造においては、それを元々構成していた陽イオンが個別に水素イオンと交換するために、水素はあらかじめ明確ではないサイトに対して、不定比の成分として無秩序に配置される場合が多い。マントルの水素の性質を考えると、このような水素の配置の方式に関する特徴は、その構造に関する特性(水素のストックに対応、最大濃度など)に加えて、輸送に関する特性(水素のフローに対応、吸水・脱水反応速度、拡散定数など)にも重要な影響を与えるであろう。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえた上で、マントル鉱物の水素の結晶学的配置の特徴と、それがもたらす水素のストック・フロー特性の関係を理解するために、中性子散乱と透過電子顕微鏡による解析を実施した。高強度パルス中性子線源の特徴を活かした散乱実験を高品質の試料結晶に対して行い、単結晶回折法と準弾性散乱法を併せた系統的な解析を、マントル鉱物の水素に対して進めた。この併用の方針をとったことで、鉱物内部の水素の微視的な構造と輸送に関する特性を互いに比較検討することが可能になり、上記の目的に対応した研究を実施できた。

中性子散乱実験に供するために必要であった、高い品質のマントル鉱物の試料結晶群は、それらの結晶成長に必要な実験技術の開発を行いつつ、高温高圧の条件においてそれぞれを合成した。同じ手法によって合成した結晶の一部に対しては、高圧その場の条件において各種の物性(格子・放射熱伝導率、鉄スピン状態、弾性など)の計測を行う実験を積極的に展開した。

### 3. 研究の方法

パルス中性子線源の特徴を活かした飛行時間ラウエ中性子単結晶回折法によって、数千個以上のブラッグ反射強度を解析に用いた、非常に高い空間分解能の下での結晶構造解析を実現した。これは水素のサイト位置、化学結合距離、サイト占有率を高い精度で決定する方法であり、いわば水素の構造解析の最終手段とも考えられる。私たちは高品質の試料単結晶を合成する方法の開発を通して、この方法の応用を世界で初めてマントル高密度含水鉱物に対して成功させた実績を有する[1, 2]。本課題においては当時よりもさらに高品質の結晶を合成して、単結晶中性子回折法の応用を拡大させることを通して、上記の目的の達成に必要な解析を進展させた。

中性子準弾性散乱法は、物質中の水素の原子核によって非干渉性散乱された中性子の運動量とエネルギーの変化を精密に分析することを通して、水素のダイナミクス、つまりサイト間跳躍の距離と頻度を求める手法であり、その帰結として非破壊計測によって水素の拡散係数を得ることも可能である。過去の応用としては、例えば粘土鉱物の層間H<sub>2</sub>O分子の拡散の計測に使われてきた。その一方で結晶構造内にサイトを持つ水素イオンの解析への準弾性散乱法の応用は、構造内の水素の拡散がH<sub>2</sub>O分子などよりもはるかに遅いために困難だと考えられてきた。私たちはパルス中性子線源の特徴を活かすことによって、この困難を克服する準備を既に済ませており[3]、本課題ではJ-PARC物質・生命科学実験施設のDNA分光器を系統的に利用して、ピコ秒からナノ秒の周期でサイト間を跳躍する水素イオンの拡散運動を検出した。DNAはこのような遅い運動を検出できる高いエネルギー分解能を有する非弾性散乱分光器であり、入射中性子が水素イオンによって散乱される際のエネルギーの微細な変化を高感度で計測することができる。

#### 4. 研究成果

##### (1) リングウッドタイトの単結晶中性子回折

マントル遷移層の主成分であり、スピネル構造を骨格とするワズレアイトとリングウッドタイトの二種の鉱物が、最大約 3 wt.%の H<sub>2</sub>O 成分を固溶できることは従来からよく知られてきた。一方でリングウッドタイトの構造中に水素がどのように吸収されるのか、および二種の鉱物の水素濃度の上限を拘束する理由が同じかどうかなど、この数字をもたらす背景に関する理解は進んでいなかった。二種の高密度鉱物は、上部マントルの主要な成分であるカンラン石と全く同じ (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> の化学組成を持ちながらも、構造に入る水素イオン濃度の上限が全く異なるが、その理由もわからない。これらの問題に対しては、含水鉱物の水素の結晶学的解析を進展させることで解答を得ることが可能になる。私たちはワズレアイト構造の内部で、特定のサイト(M3)の陽イオンのみが水素イオンと交換できることを、中性子単結晶回折による解析で既に示していた[1]。この場合の水素固容量には結晶構造に起因する厳密な上限が存在する。また私たちは、空間分解能が制約される粉末中性子回折法によるものではあるが、リングウッドタイト構造の内部では、全ての陽イオン種(Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Si<sup>4+</sup>)が水素イオンと交換可能なことも過去に示した[4]。

以上の背景のもとで、Mg 端成分の含水リングウッドタイトの結晶構造を、中性子単結晶回折による高い空間分解能を活かして解析した。水素以外の全原子の構造パラメーターも高精度で決定することができる手法の利点を活かして、交換反応による陽イオン欠損度の精密評価を併せて行った結果、水素イオンが二種の陽イオンを両方とも巻き込んだ反応によって、特定の反応式に従う形で結晶構造内に固溶することが明らかになった(図 1)。この反応式によれば、水素イオンは 12 個が集めたクラスターとして固溶しており、いわばナノスケールの欠陥を空間的にランダムにつくりだす働きをしている。このような構造は水素の拡散を容易にするものであり、これがリングウッドタイト構造中の水素イオンの移動の特異的な速さを理解するための結晶学的な根拠である。以上により、リングウッドタイトにおいてはワズレアイトとは対照的に、結晶構造に起因する水素固容量の上限は存在しない。

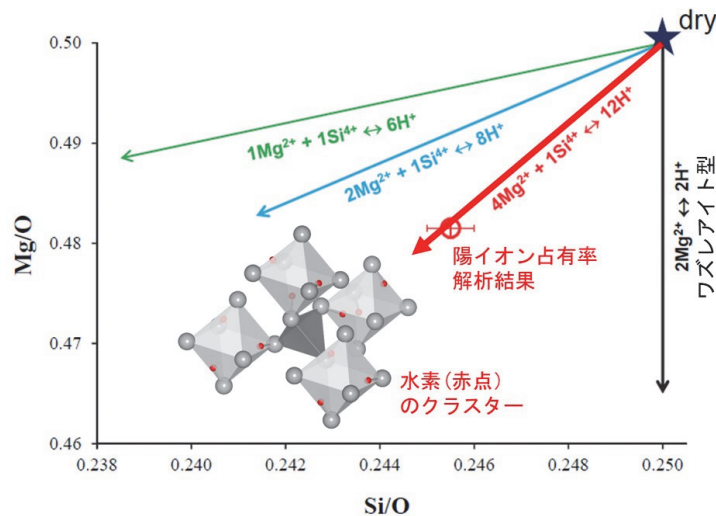


図 1. リングウッドタイトの結晶構造への水素イオン固溶の反応式と生成する水素クラスターの局所構造。横軸の Si/O モル比は反応によって生成する Si<sup>4+</sup>の欠損、縦軸の Mg/O モル比は同じく Mg<sup>2+</sup>の欠損の濃度比を示す。赤矢印の方向に反応が進むことが示されたが、これは黒線方向に進むワズレアイトとは異なる形式である (Purevjav et al. Acta Cryst. B, 2018)。

##### (2) 高密度含水マグネシウムケイ酸塩の単結晶中性子回折

本課題では重水素化した高密度含水マグネシウムケイ酸塩 Phase E (Dense Magnesium Hydrated Silicate Phase E) の単結晶の合成と、その中性子回折による構造解析も実施した。この結晶相は、沈み込む海洋プレートがマントル深部へと大量の水素を運び込む際の輸送の媒体として特に重要なものである。その水素配置の配向無秩序を捉え、この結晶相が示す高温での安定性の起源を明らかにした (Purevjav et al. IUCrJ, 2020)。さらに高温その場条件における水素配置の解析を行い、その空間分布が温度とともに拡散した状態に変化することを示した。

### (3) 中性子準弾性散乱

ブルーサイト  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  は単純な層構造の内部に多量の水素を保持できるという、含水鉱物の最も特徴的かつ典型的な構造を有する。一方でこの構造は加熱に対して弱い。ブルーサイトが加熱されて脱水分解に至る際に、水素がどのように構造から外れて移動するのかを調べることは、マンツルのような含水鉱物が分解して水をもたらす現象の微視的な過程を理解するための出発点となるだろう。そこで中性子準弾性散乱法によるブルーサイトの解析を行い、その結晶構造中を移動する水素イオンの状態の温度変化を捉えた(図2)。温度 180 K 以下では水素イオンの移動は完全に停止していたが、温度 230 K において 3 Å の距離スケールの制限空間での跳躍運動が存在し始め、以後は温度の上昇とともに移動中の水素イオンの濃度、跳躍の頻度、および跳躍の距離が併せて増加した。その結果、隣接サイト間隔を大きく超える跳躍の距離が実際に観測されたが、これは水素空孔の生成とその拡散を仮定した場合には説明が難しい結果である。つまり空孔ではなく格子間に存在する水素イオンが引き起こす水素輸送現象の存在が確認された。温度 430 K 以上では 1.9 Å の距離にある隣接サイトへ層をまたいで跳躍するという、これまでとは異なるタイプの水素輸送現象が新たに出現した(図2)。以上のブルーサイトの解析に加えて、他のマンツル高密度含水鉱物の合成と解析も行った。このうち高密度含水マグネシウムケイ酸塩 Phase E に対して得られた結果の一部を併せて示す(図2)。

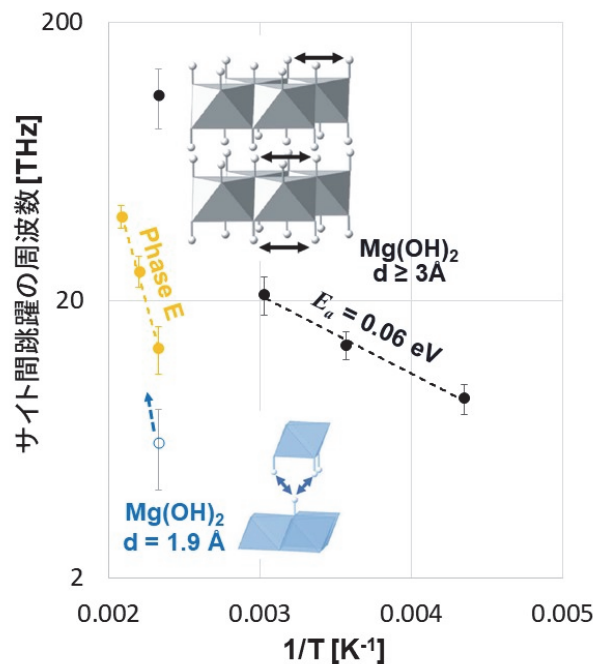


図2. 水素の跳躍頻度の温度変化(Okuchi et al. J. Appl. Cryst. 2018)。

### (4) 物性測定

本課題の目的を達成するために合成実験を繰り返して行い、そこで得られた試料結晶の一部を用いてマンツルの高圧その場の条件における各種の物性計測を行うことで、深部マンツルの性質の理解に対して貢献した(Fu et al. Geophys. Res. Lett. 2018 など)。

#### <引用文献>

- [1] Purevjav, N., T. Okuchi, N. Tomioka, X. Wang, C. Hoffmann, Quantitative analysis of hydrogen sites and occupancy in deep mantle hydrous wadsleyite using single crystal neutron diffraction, Sci. Rep., 6, 34988 (2016)
- [2] 奥地拓生(研究代表者)、パルス中性子回折による高品質含水マンツル深部鉱物単結晶の水素配置解析、科研費基盤研究(B)(No. 26287135)
- [3] 奥地拓生(研究代表者)、パルス中性子準弾性散乱によるマンツル深部含水鉱物の水素拡散ダイナミクス、科研費挑戦的萌芽研究(No. 15K13593)
- [4] Purevjav, N., T. Okuchi, N. Tomioka, J. Abe, S. Harjo, Hydrogen site analysis of hydrous ringwoodite in mantle transition zone by pulsed neutron diffraction, Geophys. Res. Lett., 41, 6718-6724 (2014)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計37件（うち査読付論文 34件 / うち国際共著 28件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 OKUCHI Takuo	4. 巻 50
2. 論文標題 Structure and dynamics of hydrogen in materials of Earth and planetary interiors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 31~42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/gkk.210120	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomioaka Naotaka, Bindi Luca, Okuchi Takuo, Miyahara Masaaki, Iitaka Toshiaki, Li Zhi, Kawatsu Tsutomu, Xie Xiande, Purevjav Narangoo, Tani Riho, Kodama Yu	4. 巻 2
2. 論文標題 Poirierite, a dense metastable polymorph of magnesium iron silicate in shocked meteorites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-020-00090-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 奥地拓生, 尾崎典雅	4. 巻 49
2. 論文標題 高強度レーザーを用いた惑星物質の衝撃圧縮実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 35-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Gu Jesse T., Fu Suyu, Gardner James E., Yamashita Shigeru, Okuchi Takuo, Lin Jung-Fu	4. 巻 106
2. 論文標題 Nonlinear effects of hydration on high-pressure sound velocities of rhyolitic glasses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1143~1152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2021-7597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Purevjav Narangoo, Okuchi Takuo, Hoffmann Christina	4. 巻 7
2. 論文標題 Strong hydrogen bonding in a dense hydrous magnesium silicate discovered by neutron Laue diffraction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IUCrJ	6. 最初と最後の頁 370 ~ 374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S2052252520003036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Lee Sung Keun, Mun Kwan Young, Kim Yong-Hyun, Lhee Juho, Okuchi Takuo, Lin Jung-Fu	4. 巻 11
2. 論文標題 Degree of Permanent Densification in Oxide Glasses upon Extreme Compression up to 24 GPa at Room Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2917 ~ 2924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c00709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fu Suyu, Yang Jing, Karato Shun ichiro, Vasiliev Alexander, Presniakov Mikhail Yu., Gavriliuk Alexander G., Ivanova Anna G., Hauri Erik H., Okuchi Takuo, Purevjav Narangoo, Lin Jung Fu	4. 巻 46
2. 論文標題 Water Concentration in Single Crystal (Al,Fe) Bearing Bridgmanite Grown From the Hydrous Melt: Implications for Dehydration Melting at the Topmost Lower Mantle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 10346 ~ 10357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL084630	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fu Suyu, Yang Jing, Tsujino Noriyoshi, Okuchi Takuo, Purevjav Narangoo, Lin Jung-Fu	4. 巻 518
2. 論文標題 Single-crystal elasticity of (Al,Fe)-bearing bridgmanite and seismic shear wave radial anisotropy at the topmost lower mantle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.04.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hsieh Wen-Pin, Deschamps Frederic, Okuchi Takuo, Lin Jung-Fu	4. 巻 115
2. 論文標題 Effects of iron on the lattice thermal conductivity of Earth's deep mantle and implications for mantle dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 4099 ~ 4104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1718557115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fu Suyu, Yang Jing, Zhang Yanyao, Okuchi Takuo, McCammon Catherine, Kim Hyo-Im, Lee Sung Keun, Lin Jung-Fu	4. 巻 45
2. 論文標題 Abnormal Elasticity of Fe-Bearing Bridgmanite in the Earth's Lower Mantle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 4725 ~ 4732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL077764	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okuchi Takuo, Tomioka Naotaka, Purevjav Narangoo, Shibata Kaoru	4. 巻 51
2. 論文標題 Quasielastic neutron scattering of brucite to analyse hydrogen transport on the atomic scale	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Crystallography	6. 最初と最後の頁 1564 ~ 1570
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600576718013158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Hong, Lin Jung-Fu, Hu Michael Y., Roskosz Mathieu, Bi Wenli, Zhao Jiyong, Alp Esen E., Liu Jin, Liu Jiachao, Wentzowitch Renata M., Okuchi Takuo, Dauphas Nicolas	4. 巻 506
2. 論文標題 Iron isotopic fractionation in mineral phases from Earth's lower mantle: Did terrestrial magma ocean crystallization fractionate iron isotopes?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 113 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2018.10.034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fu Suyu, Yang Jing, Zhang Youjun, Liu Jiachao, Greenberg Eran, Prakapenka Vitali B., Okuchi Takuo, Lin Jung-Fu	4. 巻 503
2. 論文標題 Melting behavior of the lower-mantle ferropericlasite across the spin crossover: Implication for the ultra-low velocity zones at the lowermost mantle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2018.09.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Purevjav, T. Okuchi, X. Wang, C. Hoffmann, N. Tomioka	4. 巻 74
2. 論文標題 Determination of hydrogen site and occupancy in hydrous Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> spinel by single-crystal neutron diffraction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Crystallographica Section B	6. 最初と最後の頁 115-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S2052520618000616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hsieh Wen-Pin, Marzotto Enrico, Tsao Yi-Chi, Okuchi Takuo, Lin Jung-Fu	4. 巻 584
2. 論文標題 High thermal conductivity of stishovite promotes rapid warming of a sinking slab in Earth's mantle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117477 ~ 117477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2022.117477	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 OKUCHI Takuo, OZAKI Norimasa	4. 巻 31
2. 論文標題 Ultrafast In-Situ Analysis of Shock-Compressed Planetary Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Review of High Pressure Science and Technology	6. 最初と最後の頁 166 ~ 171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.31.166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 OKUCHI Takuo	4. 巻 63
2. 論文標題 Quasielastic Neutron Scattering for Analyzing Transport Dynamics of Chemically-Bound Hydrogen in Minerals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nihon Kessho Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 129 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5940/jcrsj.63.129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Yanyao, Fu Suyu, Karato Shun ichiro, Okuchi Takuo, Chariton Stella, Prakapenka Vitali B., Lin Jung Fu	4. 巻 127
2. 論文標題 Elasticity of Hydrated Al Bearing Stishovite and Post Stishovite: Implications for Understanding Regional Seismic Anomalies Along Subducting Slabs in the Lower Mantle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB023170	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計60件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 29件)

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 含水鉱物の水素配置と水素輸送の統合解析
3. 学会等名 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuo Okuchi
2. 発表標題 Planetology using high-power laser and X-ray free electron laser
3. 学会等名 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuo Okuchi
2. 発表標題 Laboratory exploration of planetary materials using high power lasers
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 水素を含む地球惑星内部物質の構造と拡散の研究
3. 学会等名 日本鉱物科学会2020年度年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 高強度レーザー・XFEL・中性子の複合利用による惑星物質探査科学
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuo Okuchi, Naotaka Tomioka, Purevjav Narangoo, Yusuke Seto, Toshinori Yabuuchi, Makina Yabashi, Ryosuke Kodama, and Norimasa Ozaki
2. 発表標題 Fast recrystallization process of dense mineral crystals by asteroid impacts in the early solar system, as simulated by laser-driven shock and analyzed in-situ by SACLA XFEL
3. 学会等名 OptoX-nano 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuo Okuchi
2. 発表標題 Laser-shock experiments at SACLA for simulating impact events in the early solar system: current status and perspective
3. 学会等名 SACLA Users' Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥地拓生、Narangoo Purevjav、尾崎典雅、松岡健之、瀬戸雄介、丹下慶範、藪内俊毅、富岡尚敬、関根利守、兒玉了祐
2. 発表標題 Linking occurrence and texture of dense silicate minerals in shocked meteorites with laser-shock experimental results of Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> analyzed by XFEL probe
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥地拓生・PUREVJAV Narangoo・尾崎典雅・瀬戸雄介・松岡健之・梅田悠平・片桐健登・森岡信太郎・富岡尚敬・関根利守・飯高敏晃・藪内俊毅・宮西宏併・矢橋牧名・兒玉了祐
2. 発表標題 カンラン石及び同高压相のレーザー衝撃圧縮時間分解その場X線回折
3. 学会等名 第60回高压討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Purevjav, N., T. Okuchi, N. Ozaki, T. Sano, Y. Umeda, S. Morioka, N. Kammura, H. Nagayasu
2. 発表標題 Shock compression measurements of synthetic wadsleyite and ringwoodite single crystals
3. 学会等名 第60回高压討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥地拓生・プレジャブナランゴー・尾崎典雅・瀬戸雄介・数内俊毅
2. 発表標題 フォルステライト単結晶のレーザー衝撃圧縮その場X線回折実験
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥地拓生・プレジャブナランゴー・瀬戸雄介・富岡尚敬・柴田薫・山田武
2. 発表標題 中性子散乱による地球深部鉱物の水素配置と水素拡散の統合解析
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fu, S., J. Yang, Y. Zhang, T. Okuchi, N. Tsujino, N. Purevjav, J. F. Lin
2. 発表標題 High-Pressure Elasticity of (Al,Fe)-bearing Bridgmanite: Implications to Lower-Mantle Geophysics and Geochemistry
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lin, J. F., S. Fu, J. Yang, S. Karato, A. Vasiliev, M. Y. Presniakov, A. G. Gavrilliuk, A. G. Ivanova, E. Hauri, T. Okuchi, N. Purevjav
2. 発表標題 Water Concentration in Single-Crystal (Al,Fe)-bearing Bridgmanite and its Possible Implications for the Dehydration Melting below 660 km Depth
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Gu, J. T., S. Fu, J. E. Gardner, S. Yamashita, T. Okuchi, J. F. Lin
2 . 発表標題 Anomalous Elasticity of Dry and Hydrous Rhyolitic Glasses up to 3 GPa
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Wei, X., J. F. Lin, D. Zhang, H. Liu, T. Okuchi
2 . 発表標題 Single-crystal refinement of (Fe,Al)-bearing bridgmanite structure at high pressure
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tomioka, N., T. Okuchi, M. Miyahara, T. Iitaka, N. Purevjav, R. Tani, Y. Kodama,
2 . 発表標題 Topotaxial intergrowths of epsilon-(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> in wadsleyite and ringwoodite in shocked chondrites
3 . 学会等名 82nd Annual Meeting of the Meteoritical Society ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Purevjav, N., T. Okuchi, C. Hoffmann
2 . 発表標題 Strong hydrogen-bond generation in dense hydrous magnesium silicate phase E observed by single-crystal neutron diffraction
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Purevjav, N., T. Okuchi, N. Ozaki, T. Sano, Y. Umeda, S. Morioka, N. Kamimura
2. 発表標題 Laser-shock experiments of dense polymorphs of Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> : technical developments using synthetic single crystals
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tonioka, N., T. Okuchi, M. Miyahara
2. 発表標題 Lattice-shear-induced metastable formation of high-pressure silicates in shocked meteorites
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 パルス中性子を使った地球深部水素の単結晶構造解析とダイナミクス解析
3. 学会等名 A T I 水和ナノ構造研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Okuchi
2. 発表標題 Linking structures and textures of naturally-shocked planetary materials with laser-shocked crystals analyzed in-situ by XFEL diffraction
3. 学会等名 Laser Shock Workshop in 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Okuchi, N. Purevjav, N. Ozaki, T. Matsuoka, Y. Seto, Y. Tange, Y. Inubushi, N. Tomioka, T. Sekine
2. 発表標題 Time-resolved transformation process of olivine into denser crystal structure during shock compression analyzed by x-ray free electron laser
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥地拓生・プレジャブナランゴウ・富岡尚敬・土山明・柴田薫
2. 発表標題 中性子散乱による地球深部鉱物の水素配置と水素拡散の統合解析
3. 学会等名 日本中性子科学会第18回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥地拓生・プレジャブナランゴウ・尾崎典雅・松岡健之・瀬戸雄介・丹下慶範・犬伏雄一・藪内俊毅・矢橋牧名・富岡尚敬・関根利守・兒玉了祐
2. 発表標題 レーザー衝撃圧縮によるフォルステライト単結晶の超高速圧縮と構造変化、破壊過程
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥地拓生・プレジャブナランゴウ・富岡尚敬・土山明・柴田薫
2. 発表標題 含水非晶質ケイ酸塩微粒子の中性子による水素拡散解析(低温編)
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥地拓生・プレジャブナランゴ・尾崎典雅・瀬戸雄介・丹下慶範・関根利守・富岡尚敬・松岡健之・高橋謙次郎・梅田悠平・宮西宏併・犬伏雄一・藪内俊毅・兒玉了祐
2. 発表標題 衝撃圧縮その場での時間分解XFEL回折による衝撃変成カンラン石の構造転移機構
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Purevjav, T. Okuchi, N. Tomioka, X. Wang, C. Hoffmann
2. 発表標題 Storage mechanisms of water into ringwoodite
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Gu, T., S. Fu, J. E. Gardner, S. Yamashita, T. Okuchi, J. F. Lin
2. 発表標題 The Effect of H <sub>2</sub> O on the Anomalous Velocities of Rhyolitic Glasses up to 3 GPa
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 X. Wei, J. F. Lin, D. Zhang, T. Okuchi
2. 発表標題 Single-crystal structure of bridgmanite and its possible effects on physical properties of the lower mantle
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年



1 . 発表者名 H. Yang, M. Y. Hu, J. F. Lin, M. Roskosz, W. Bi, J. Zhao, E. E. Alp, J. Liu, J. Liu, R. Wentzcovitch, T. Okuchi, N. Dauphas
2 . 発表標題 Iron Isotopic Fractionation in Earth's Lower Mantle
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fu, J. Yang, Y. Zhang, T. Okuchi, J. F. Lin
2 . 発表標題 Elasticity of (Al,Fe)-bearing bridgmanite at high pressure: Implications to seismic observations of the Earth 's lower mantle
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Purevjav, T. Okuchi, Y. Seto, T. Ohhara, K. Munakata
2 . 発表標題 Single crystal neutron diffraction study of dense hydrous magnesium silicate phase E
3 . 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Purevjav, T. Okuchi, X. Wang, C. Hoffmann, N. Tomioka
2 . 発表標題 Locating hydrogen in lower mantle transition zone hydrous ringwoodite
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Tomioka, T. Okuchi
2. 発表標題 Epsilon-Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , a new spinelloid in a shocked meteorite highlighting diffusionless phase transitions among olivine polymorphs
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富岡尚敬・奥地拓生・宮原正明・藤野清志・入船徹男・谷理帆・兒玉優
2. 発表標題 新Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> スピネロイドの準安定的形成
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富岡尚敬・奥地拓生
2. 発表標題 衝撃変成を受けたLコンドライト中のカンラン石新高压相
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Okuchi
2. 発表標題 Nanoscale texture and transformation timescale of dense Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> polymorphs in shocked meteorites: comparison between natural occurrences by high-resolution TEM and experimental results by fast XFEL diffraction
3. 学会等名 Joint symposium of Misasa 2019 & Core Mantle Coevolution (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Purevjav, T. Okuchi, N. Tomioka, X. Wang, C. Hoffmann
2. 発表標題 Probing hydrogen by single-crystal neutron diffraction in deep mantle hydrous minerals
3. 学会等名 Joint symposium of Misasa 2019 & Core Mantle Coevolution (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. F. Lin
2. 発表標題 Internally-consistent multiple constraints on the mineralogy and seismology of Earth's lower mantle
3. 学会等名 Joint symposium of Misasa 2019 & Core Mantle Coevolution (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 単結晶フォルステライトで見出された超高速構造変化の可能性
3. 学会等名 CMRC・Hermes研究会「P-V-T-d /dt 構造物性」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 パワーレーザーとXFELによる惑星物質の衝撃圧縮状態研究
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第38会年次大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Tomioka
2. 発表標題 Lattice-shear-induced formation of a new Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> spinelloid in shocked meteorites
3. 学会等名 4th HiPeR International Symposium at Hiroshima University (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Purevjav N., T. Okuchi, X. Wang, C. Hoffmann
2. 発表標題 Hydration mechanism of ringwoodite resolved by high-resolution single crystal neutron diffraction
3. 学会等名 日本鉱物科学会年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	富岡 尚敬  (TOMIOKA Naotaka)  (30335418)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任技術研究員   (82706)	
研究 分担者	瀬戸 雄介  (SETO Yusuke)  (10399818)	神戸大学・理学研究科・講師   (14501)	2020年度に追加

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	プレジャブ ナランゴ  (PUREVJAV Narangoo)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	リン ジュンフー  (LIN Jung-Fu)		
連携研究者	瀬戸 雄介  (SETO Yusuke)  (10399818)	神戸大学・理学研究科・講師   (14501)	
連携研究者	山下 茂  (YAMASHITA Shigeru)  (30260665)	岡山大学・惑星物質研究所・准教授   (15301)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	ソウル国立大学	延世大学校		
中国	北京高圧科学研究中心			
台湾	台湾中央研究院			
米国	テキサス大学	オークリッジ国立研究所		
ドイツ	バイロイト大学			